連載

エンジニアの素朴なギモン

第5回 電気の壁と磁気の壁

小暮裕明

電磁界シミュレータを使い始めると，電気壁や磁気壁（表1）という専門用語に戸惑うエンジニアが少なくない．これらは現実の世界には存在しないので，直感的にとらえづらい．電気壁は無損失の導体板をイメージすればよいが，磁気壁は理解しづらい．しかし最近メタマテリアル注1の研究が進み，特定周波数における実現の可能性が注目されている．（筆者）

新人：**図1**の線路は，**図2**のようにモデリングすると，線路の導体が半分になることで，電磁界シミュレータのメモリ使用量は1/4に節約できるそうです注2．

先輩：**図1**のポートに注目すると，下側の線路はポート番号が負になっている．－1ポートの電流は＋1ポートの電流と向きが逆で等量，つまりこれは差動モード(1)だ．

図2が**図1**と等価というのは，シミュレータの閉じた環境と関係していますか．

その通り．開放空間の問題は積分演算で解くが，パソコンでは時間がかかる．そこで，電磁界シミュレータのSonnetでは，4面を電気壁とすることでFFTによって高精度な結果を得ている．

電気の壁…ですか．

これは直観的には無損失の導体，つまり完全導体注3の箱をイメージすればよい．電界ベクトルは電気壁に垂直で，磁界ベクトルは電気壁に平行になるから，これらの条件を満たすように空間内の電磁界分布（モードと呼ぶ）が確定する．**図2**で線路側に近い壁は電気壁だが，これは**図1**の中央にある対称面にあたるので，対称境界（Symmetry Boundary）と呼ぶこともある．

図2の電気壁の先に，鏡に映った線路（鏡像）を描くと**図3**のようになりますから，**図2**が2本の線路と等価であることが分かります．しかしなぜ差動モードになるのか分かりません．

注1 メタマテリアルとは，規則正しい構造配列の周期が，電磁波などの波動の波長に関与して現れる特異な物理現象を人工的に作りだした媒質．自然界に存在しないという意味で人工媒質とも呼ばれる．
注2 モーメント法で用いる行列サイズは，離散化した要素数の2乗に比例する．ソネット技研のWebサイトにある「Tips」の「EvenとOddモードパラメータの扱い方」の項を参照．
http://www.sonnetsoftware.co.jp/support/tips/
無償版のSonnet Liteも同サイトからダウンロードできる．
注3 完全導体は電気抵抗がゼロの物質をいう．超伝導体は電気抵抗がゼロのほか，マイスナー効果（内部磁界がゼロになる）を示す．

表1 電気壁と磁気壁

	別の名称	特 徴	人工物
電気壁（Electric Wall）	完全導体PEC（Perfect Electric Conductor）	電界は表面に垂直	超伝導体 *注3を参照
磁気壁（Mgnetic Wall）	完全磁性体PMC（Perfect Magnetic Conductor）	磁界は表面に垂直	高インピーダンス面として発明されたAMC（Artificial Magnetic Conductor）

KeyWord 電気壁，磁気壁，完全導体，対称境界，鏡像，差動モード，RFID，並列*LC*共振，高インピーダンス面
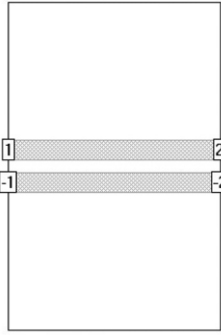
図1　差動線路のモデリング例

Sonnet Liteによるモデルである．
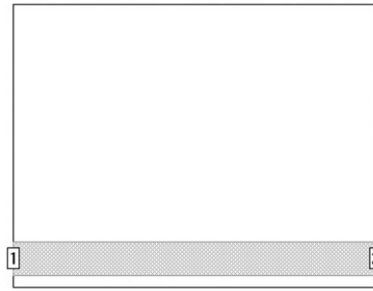
図2　差動線路と等価なモデル

側壁が電気壁であることを利用して，解析空間を半分にしている．
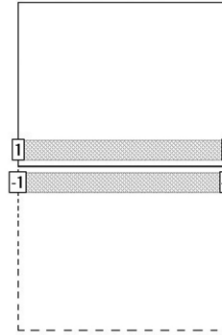
図3　鏡像

図2の電気壁（青線の位置）を対称面とした鏡像を描くと図1と同じになる．
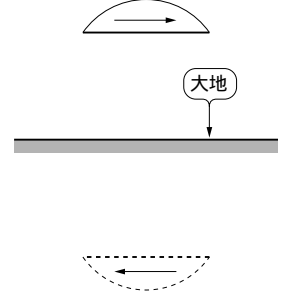
図4　完全導体板がアンテナの鏡像を作る

大地の近くにあるダイポール・アンテナとそのイメージ・アンテナを説明するときによく使われる図．

● 鏡像の正体

鏡に映る姿を見ていると飽きないね．右手が映ると左手になるから左右逆だが，なぜ上下は逆ではないのだろう．

えっ…？

それはともかく，なぜ電気壁が鏡になるのかを考えてみよう．

そうだ，地面近くのダイポール・アンテナ（**図4**）を思い出しました．教科書ではグラウンドを無限の完全導体板として説明しています．

よく気がついたね．**図4**は完全導体板（すなわち電気壁）がアンテナの鏡像を作るという説明だ．イメージ・アンテナともいう．ここで矢印は電流の向きを表しているが，互いに逆向きだ．

アンテナを地面に近づけると電波は飛ばなくなると思います．

その通り．**図5**は60mm長のアンテナを55mm×90mmの完全導体板上5mmの位置に置いたモデルで，これほど近づけば，アンテナというよりもマイクロストリップ線路のようだ．グラウンド板に流れる電流は，まるでアンテナが鏡に映っているようで，これが鏡像という命名の根拠かもしれない．

そもそも電気壁に逆向きの電流が誘導されるしくみが分かりません．

図6は磁界ベクトルを小さな円錐で表しており，その向きは常に導体面に平行なので，アンテナの周りにループ状に分布している．アンテナに線状電流が流れると，このように周りに磁界が発生するが[注4]，磁界ベクトル

注4　右ネジを電流の流れる方向に回すと，磁力線はネジの回転する向きにできる．
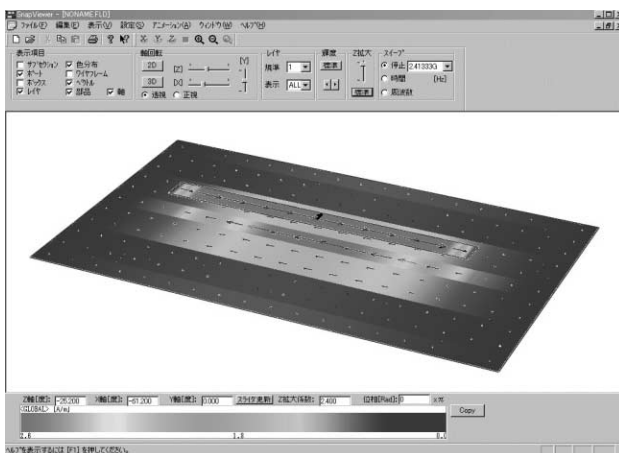
図5　ダイポール・アンテナを完全導体板上に置いたモデル

60mm長のダイポール・アンテナを55mm×90mmの完全導体板上5mmの位置に置いた．エム・イー・エルの電磁界シミュレータSNAP-Fieldを使用．
http://www.melinc.co.jp/
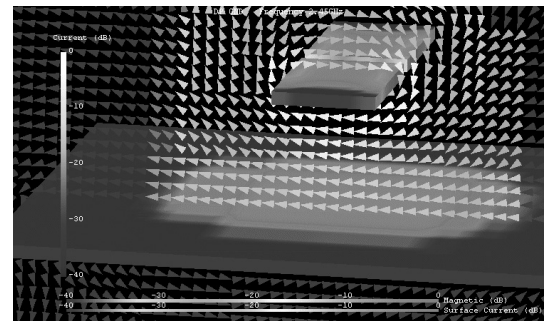
図6　アンテナの周りに分布する磁界ベクトル

小さな円錐で表しており，向きは常に導体面に平行になるので，ループ状に分布している．
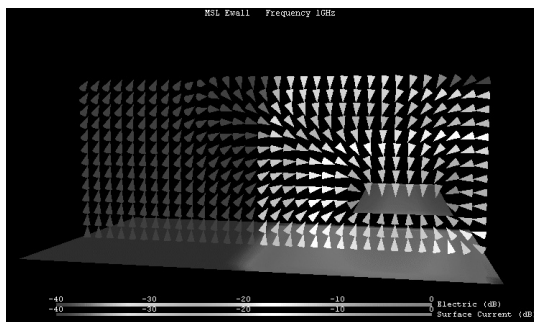
図7　差動線路と等価なモデルの電界ベクトル
図2の線路の周りに分布する電界ベクトル表示である．右側面の電気壁に対して垂直に分布している．
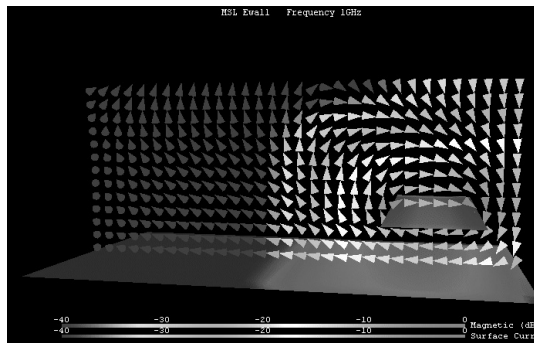
図8　差動線路と等価なモデルの磁界ベクトル
図2の線路の周りに分布する磁界ベクトル表示である．右側面の電気壁に対して平行に分布している．

は近傍の導体表面にも平行で，これにより電流が誘導されるわけだ．

レンツの法則[注5]ですね．

その通り．導体表面の磁束は電流を誘導するが，その方向は誘導電流の原因（すなわちアンテナの磁束変化）を妨げる向きに発生する．

● 電気壁とモノポール・アンテナ

図7は**図2**の電界ベクトル表示だが，電気壁に対して垂直に分布している．また磁界ベクトルは電気壁に対して平行になっている（**図8**）．**図9**と**図10**は**図1**の電界および磁界ベクトルで，対称面がイメージできる．

よく分かりました．ところで**図4**のイメージ・アンテナを現実のダイポール・アンテナに替えて，互いに反対方向の電流を流すとします．2本のアンテナ間隔が波長に比べて十分短ければ，それぞれから放射される電磁波の多くは打ち消されてしまいます．

注5　レンツ（Lentz）は，電磁誘導によって発生する起電力が磁束変化を妨げる電流を生ずるような向きに発生することを発見した．

900MHz帯のRFIDタグの多くはダイポール・アンテナだが，金属に貼り付けると通信できなくなる理由が説明できるね．アンテナの入力インピーダンスも大きく変化するので，タグICとのインピーダンス整合も悪化する．

モノポール・アンテナと電気壁はどうでしょうか．

これは接地型のアンテナだから，イメージ・アンテナは**図11**のようになる．

図12はダイポール・アンテナの電界ベクトルですが，**図13**のモノポール・アンテナは完全導体板が対称面になっています．

図13のグラウンド板を無限の電気壁に替えると**図12**と等価になる．

しかしダイポール・アンテナの入力インピーダンスは約73 Ω，モノポール・アンテナは約36 Ωです．
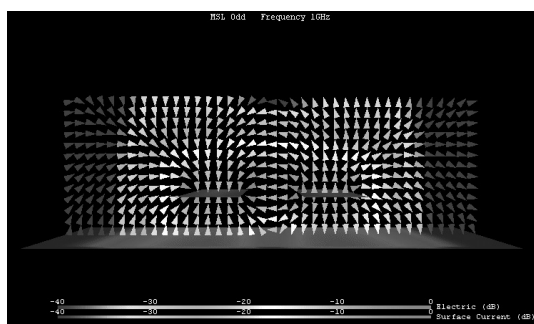
図9　差動線路の周りの電界ベクトル表示
対称面がイメージできる．
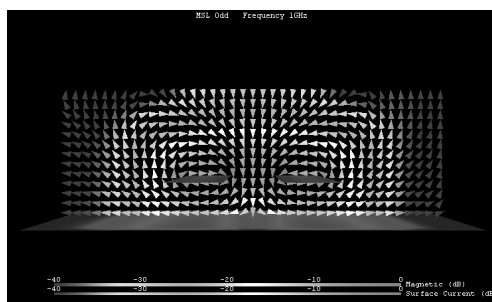
図10　差動線路の周りの磁界ベクトル表示
対称面がイメージできる．

図11
接地型のアンテナのイメージ・アンテナ
大地の近くにあるモノポール・アンテナとそのイメージ・アンテナを説明するときによく使われる図．
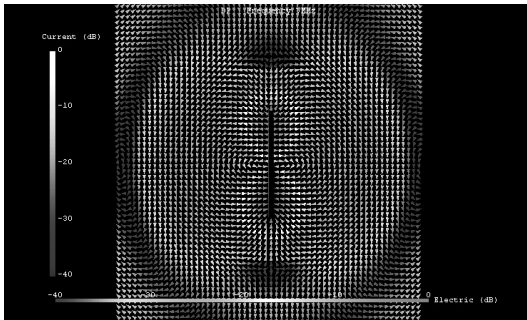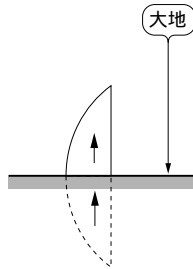
図12　ダイポール・アンテナの近傍の電界ベクトル

なるほど．これは**図14**がダイポール・アンテナと等価なモノポール・アンテナ(2)だから，入力インピーダンスはダイポール・アンテナの半分になるね．

● 磁気壁とは

電気壁が分かれば磁気壁はイメージしやすい．

今度は磁界ベクトルが磁気壁に対して垂直で，電界ベクトルは磁気壁に平行ですね．
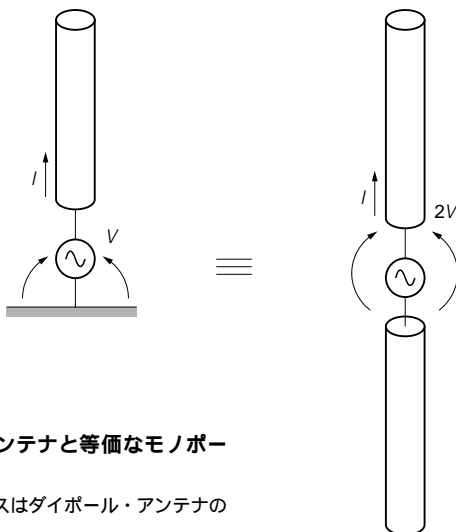
図14
ダイポール・アンテナと等価なモノポール・アンテナ
入力インピーダンスはダイポール・アンテナの半分になる．
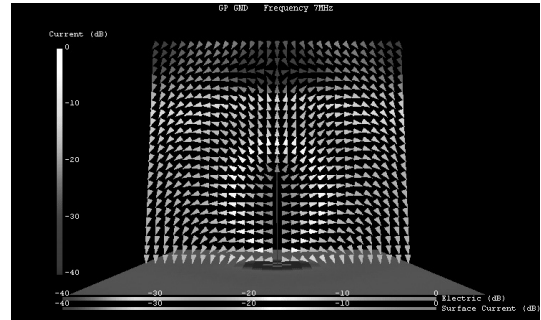
図13　モノポール・アンテナの近傍の電界ベクトル
完全導体板が対称面になっている．

その通り．SonnetはSymmetry機能をONにすると，**図15**のような点線が表示されて，そこに対称面が置かれる．これは**図16**のモデルと等価になる．

ポート番号が正なので，偶(Even)モードですね．今度は電界と磁界の分布が想像できそうです．

図17は矩(く)形パッチ・アンテナだが，磁気壁のおかげで解析空間は半分で済む．

磁気壁は空間の節約に役立つことは分かったのですが，その物理的な意味がまだよく分かりません．

電磁波は遠方から電気壁に入射すると完全反射して，反射波の位相は180度反転する．磁気壁は電磁波が同相で完全反射するが，現実の世界には存在しない．ところが最近**図18**のようなマッシュルーム構造が提案された．六角プレート間のギャップでC，ビアとグラウンドの電流路でLを構成し，微細な並列LC共振回路を敷き詰めた(3)．

このようなシートは何の役に立つのですか．
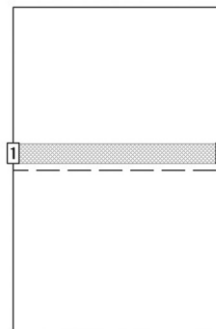
図15　Symmetry機能をONにしたSonnetモデル
点線は磁気壁の位置を示す．
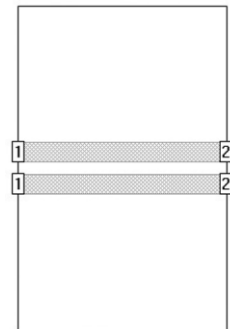
図16　図15と等価な線路モデル
磁気壁が対称面の場合は，偶(even)モードになる．

図17
Symmetry機能をONにした矩形パッチ・アンテナのモデル
上半分の図形のみを描けば，鏡像を含むアンテナ全体のモデルと等価になる．
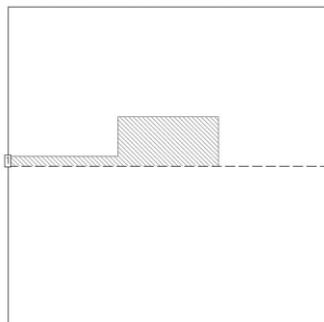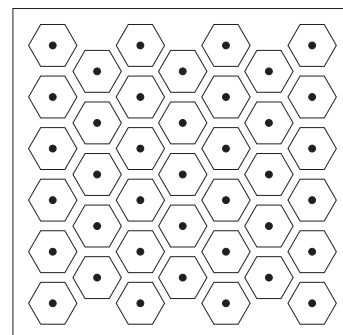
図18
高インピーダンス面を実現するマッシュルーム構造

並列共振回路のインピーダンスは高くなるので高インピーダンス面とも呼ばれている．そこでダイポール・アンテナを置いても電気壁のように逆相の誘導電流でキャンセルされることはない．

それどころか同相のイメージ・アンテナができれば，電波はさらに強く放射されそうです．

実に素直な論理展開だが，首尾よくいくかな．

私はナイーブなので….

本来ナイーブ（Naive）は素朴な，という意味だけれど….

参考・引用*文献

(1) 小暮裕明；第1章　差動インターフェース活用のメリットを見る，クロストークが抑えられるわけを理解する，Design Wave Magazine，pp.100-107，2005年9月号.
(2) 電子通信情報学会編；アンテナ工学ハンドブック，pp.50-51，オーム社，1980年（第1版）.
(3) D.Sievenpiper et al.,“ High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band ”, *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, pp.2059-2074, vol.47, Nov. 1999.

こぐれ・ひろあき
小暮技術士事務所・技術士（情報工学部門）
http://www.kcejp.com/